Терехов Александр Иванович
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ЦЭМИ РАН.
Тел. (499) 724-25-62,
a.i.terekhov@mail.ru

О ФОРМИРОВАНИИ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ И НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ (НА ПРИМЕРЕ «УГЛЕРОДНОГО» НАПРАВЛЕНИЯ)

Введение

Нанотехнология – выбранный правительствами многих стран научно-технический приоритет. Около 60 стран в настоящее время приняли национальные нанотехнологические программы, а суммарные правительственные инвестиции в исследования и разработки в этой области превысили в 2006 г. 6 млрд долларов. В России разрабатывается и должна быть принята комплексная программа развития наноиндустрии, создана Российская корпорация нанотехнологий с предполагаемым среднегодовым бюджетом до 2015 г. около 1 млрд долларов. О степени концентрации государственного финансирования говорит следующее сравнение: если в США доля нанотехнологий в расходах федерального бюджета на науку в 2006 г. составляла до 1 %, то в России около 5 %. (Следует, правда, добавить, что в том же году инвестиции американских корпораций в нанотехнологические исследования и разработки превысили правительственные.) Ввиду значительных размеров и концентрации выделяемых ресурсов важно их эффективное распределение и расходование. Поскольку нанотехнология в большой степени еще нанонаука, это подразумевает серьезное внимание к формированию и управлению исследовательским портфелем национальной нанотехнологической программы. В силу того, что нанотехнология – типичный пример ориентированных фундаментальных научных исследований, необходимо не только поддерживать и развивать сами эти исследования, но и процесс превращения их результатов в интеллектуальную собственность. Наконец, без масштабной коммерциализации научных достижений невозможно добиться успеха в развернувшейся международной нанотехнологической гонке.

Наноматериалы непосредственно пересекают грань между нанонаукой и нанотехнологией, а роль углеродных наноструктур является ведущей на этапе эволюционной нанотехнологии, когда целью становится не просто получение улучшающего эффекта, а построение эффективных наноустройств. Это позволяет рассматривать последние (прежде всего фуллерены и нанотрубки) как удобную «модель» для обсуждения и апробации ряда методов, способных помочь при решении перечисленных выше программных задач.

В статье представлен наукометрический анализ исследований и разработок в области углеродных нанотрубок (УНТ) с использованием доступных отечественных и зарубежных баз данных (БД); обсуждены направления и перспективы их применения, особенности коммерциализации нанотехнологических инноваций; дан краткий очерк методов, как применяемых, так и полезных в будущем для многоаспектного анализа процессов развития нанотехнологии.

Наукометрический анализ исследований и разработок в области УНТ

Открытие фуллеренов (новой формы существования молекулярного углерода) в 1985 г. стало знаменательным во многих отношениях, в том числе и тем, что стимулировало рост интереса к другим наноматериалам. Исследовательский «фуллереновый бум» привел к открытию углеродных нанотрубок: сначала многослойных – в 1991 г. японским ученым С. Иджимой из NEC Laboratories [1], затем однослойных – в 1993 г. сразу двумя группами исследователей из компаний NEC и IBM [2, 3]. Об истории и предыстории этого открытия рассказано в переводной монографии [4], о роли в ней российских ученых – в предисловии редактора перевода Л.А. Чернозатонского, а также в [5, 6]. По уникальности свойств и перспективам использования УНТ значительно превосходят фуллерены, поэтому сразу же привлекли широкий исследовательский интерес в мире, который стал особенно интенсивным после открытия в 1992 г. метода получения нанотрубок в граммовых количествах.

В силу своей массовости журнальные публикации наиболее ценны для анализа масштабов, структуры и источников развития исследований. Рост исследований по УНТ за 1991–2005 гг. проанализируем с помощью библиометрической статистики, полученной из базы данных Science Citation Index (БД SCI). В результате поиска по ключевым словам, содержащимся в названиях публикаций (статей, писем, обзоров, материалов конференций), было отобрано 12 410 работ. (Поисковое предписание: nanotub* or buckytub* or peapod* or CNT* or SWNT* or SWCNT* or DWNT* or DWCNT* or MWNT* or MWCNT*. Заметим, что при таком предписании в выборку, помимо УНТ, попали работы, посвященные нанотрубкам из некоторых неорганических материалов, а также органические нанотрубки (например, protein nanotubes). Однако их количество в процентном отношении невелико.) На рис. 1 показан рост ежегодного количества публикаций в мире, посвященных изучению нанотрубок, в сравнении с количеством публикаций по фуллеренам. Как видно из рис. 1, начиная с 2002 г. мировой интерес в изучении углеродных наноструктур сместился в пользу УНТ. Свой публикационный вклад в это направление внесли представители 72 стран, расположенных на всех континентах мира. В первую двадцатку по публикационной активности за весь период вошли: США (32,6), Китай (19,3), Япония (16,0), Южная Корея (6,5), Германия (6,0), Франция (5,8), Великобритания (4,7), Россия (3,6), Тайвань (2,5), Бельгия (2,2), Италия (2,1), Испания (2,1), Швейцария (1,8),

Индия (1,6), Канада (1,5), Сингапур (1,4), Бразилия (1,2), Израиль (1,2), Австралия (1,2), Венгрия (1,1).

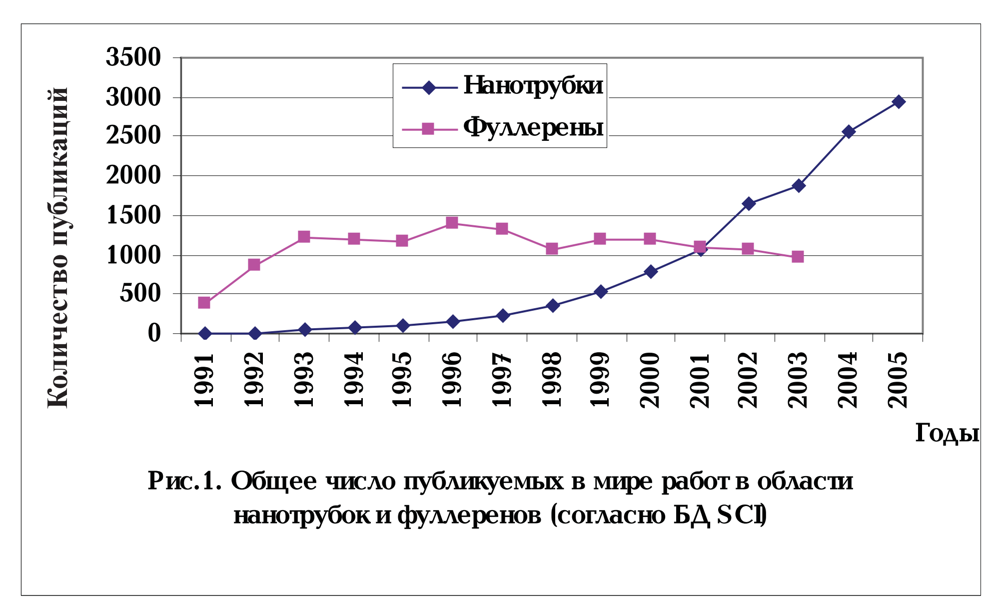


Рис.1. Общее число публикуемых в мире работ в области нанотрубок и фуллеренов (согласно БД SCI)

Примечание: В скобках указан процентный вклад каждой страны в общий массив публикаций.

После первых работ, принадлежащих японцам и россиянам, лидерство по количеству публикаций уверенно захватили ученые из США. В последние годы реальную конкуренцию им составляют только представители Китая (рис. 2). Ученые из Южной Кореи опубликовали свои первые работы по УНТ лишь в 1997 г., однако в 2001 г. они уже обошли Германию и вышли на четвертое место в мире. Россия с 1999 г. по количеству ежегодных публикаций занимает не выше 8-го места, но и здесь нас энергично в последние годы настигает Тайвань. Таким образом, по сравнению с фуллеренами [7], картина межстрановой динамики исследовательских усилий в области нанотрубок довольно сильно различается.

Как отмечалось в [7], для исследований по фуллеренам характерна широкая международная кооперация. Доля публикаций по нанотрубкам, имеющих международное соавторство, несколько уступает аналогичному показателю для фуллеренов. Кроме того, интенсивность международного сотрудничества в работах по нанотрубкам демонстрирует тенденцию к снижению: доля соавторских публикаций уменьшилась с 22,2 % в 1992–2002 гг. до 18,6 % – в 2003–2005 гг. Это может частично отражать возрастающее соперничество в данной области. Самая низкая за последние три года наблюдения доля публикаций с международным соавторством у Китая (16,9 %) и Тайваня (17,8 %). Для России этот показатель составляет 34,3 %, для США – 24,8 %. Всего на трехгодичном массиве публикаций по нанотрубкам реализовано около 2000 международных соавторских связей;

более 35 % из них приходится на долю США, а более 55 % – на долю США, Китая и Японии. Россия имела соавторские связи со всеми опережающими ее по числу публикаций странами, причем наиболее частые с США (16 %), Великобританией (12 %) и Германией (11 %).

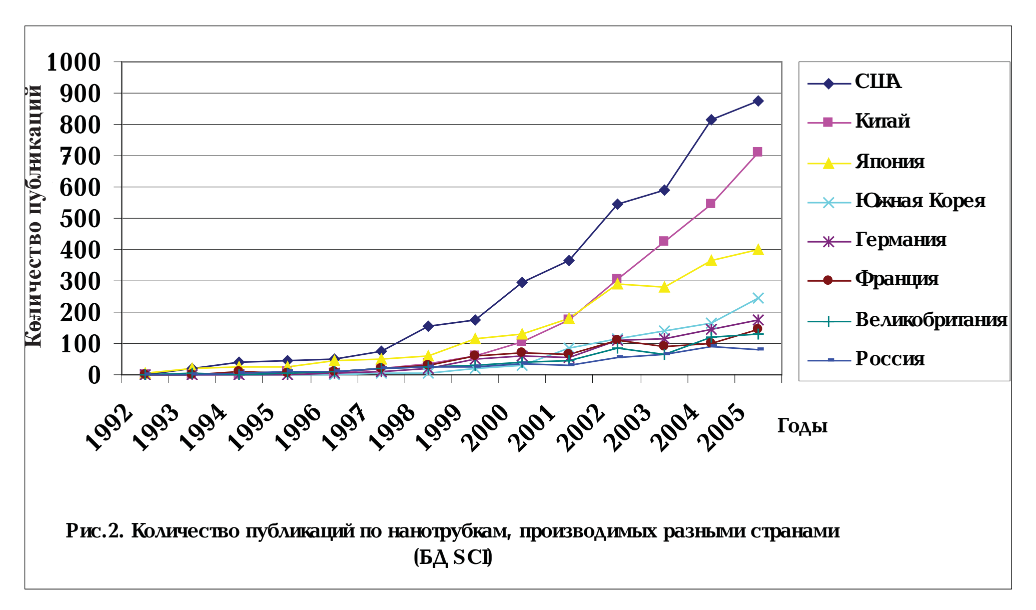


Рис.2. Количество публикаций по нанотрубкам, производимых разными странами (БД SCI)

Для 3390 мировых публикаций по нанотрубкам в 1992–2001 гг. (БД SCI) процент цитированных к 2003 г. составил 88,8 %, а среднее число ссылок на одну процитированную публикацию – 31,6. Для России аналогичные показатели: 80,2 % и 14,5 ссылок соответственно. Характерно, что международное соавторство повышает показатели цитируемости российских публикаций с 78,7 до 83,3 % для первого показателя и с 8,7 до 25,2 ссылок – для второго. Для публикаций США процент цитированных равен 87,4 %, а среднее число ссылок на одну процитированную публикацию – 48,8. Формально более высокие показатели цитируемости у Голландии (91,5 % и 97,6 ссылок), однако по количеству публикаций за рассматриваемый период она уступает США в 26 раз и, кроме того, 74,5 % ее публикаций имеют международное соавторство. Из состава работ, процитированных 100 и более раз, 68,5 % приходится на долю США. Далее следуют Япония (16,7 %), Франция (8,3 %), Голландия (5,5 %), Великобритания (5,5 %), Швейцария (4,8 %). Только одна российская публикация вошла в указанный список. Из 10 наиболее цитируемых публикаций (от 675 до 1400 ссылок) 6 имеют авторство / соавторство ученых из США, 3 – из Голландии, 2 – из Франции и Японии, 1 – из Швейцарии и Бразилии.

Таким образом, США лидируют почти по всем библиометрическим показателям. Они практически первыми перенесли акцент с изучения фуллеренов на УНТ (согласно БД SCI, в 2000 г. количество публикаций американских ученых по УНТ впервые превысило количество публикаций по фуллеренам, а в 2003 г. разрыв был уже в разы). В России подобный маневр был, очевидно, упущен (см. [8]), что негативно отразилось на формирова-

нии исследовательских заделов и научно-технологической базы для производства и применения УНТ.

Обратимся к патентной статистике. Быстрый поиск в самой крупной базе Патентного ведомства США показывает, что на 31 июля 2007 г. выдано 569 патентов, содержащих термин «carbon nanotube(s)» в реферате и 2499 – в патентной спецификации или описании. По состоянию на 2004 г. из 1259 выданных патентов США и зарегистрированных патентных заявок 28 % связаны с получением УНТ, 72 % – с их различными применениями. Вторая группа распределена по направлениям (в %):

электронные устройства (дисплеи с полевой эмиссией, генерация рентгеновского излучения, подсветка ЖК-монитора, лампы) – 37;

наноэлектроника – 22;

энергетика (топливные элементы, хранилища газа, литиевые вторичные батареи, конденсаторы и т. д.) – 14;

нанокомпозиты (высокопрочные материалы, электростатическая разрядка, проводящие пленки, экраны и поглотители электромагнитных помех и т. д.) – 13;

наномехатроника (нанозонды, нанопинцеты, нанкапсулы и т. д.) – 8;

другие применения – 6.

Для сравнения: из 1093 УНТ-патентов, выданных Патентным ведомством Японии за тот же период, 37 % связаны с получением нанотрубок; из патентов, связанных с их применениями, 44 % относятся к электронным устройствам, а 30 % – к нанокомпозитам [9]. Обладателями ключевых патентов в этой области являются такие компании, как IBM, NEC, Hyperion, Intel, GE, Nantero, Unidym, а также Rice University и Stanford University.

Коммерческий потенциал УНТ чрезвычайно высок, поэтому университеты, правительственные лаборатории, исследовательские подразделения корпораций стремятся установить широкую патентную защиту. Согласно [10], к середине 2006 г. в США уже было выдано 446 УНТ-патентов, содержащих 8557 формул изобретения, 420 из которых были блокирующего типа. Порождаемые этим юридические неопределенности способны сдерживать инвестиции в массовое производство продуктов на основе УНТ, либо приводить к значительным юридическим и лицензионным издержкам компаний, стремящимся производить такие продукты.

В России иная ситуация и проблемы. В БД Роспатента найдено всего 32 патента на изобретения, содержащих в названиях или рефератах ключевое слово «нанотруб*». За этот же период патентов, связанных с фуллеренами, было выдано почти в 5 раз больше. Динамика выдачи патентов по годам представлена на рис. 3. Из 32 патентов 10 относятся к получению и выделению нанотрубок, причем 2 – неуглеродных: нанотрубок оксида ванадия и нанотрубок из биметаллического слоя титана и золота. Применения УНТ в патентуемых изобретениях связаны с электроникой (4), биомедициной (4), авиастроением (3), криогенной техникой различного назначения (3), металлургией (2), строительством (2), химическим производством (1), электротехникой (1), нанотехнологическим оборудованием (1), экологией (1). Символично, что среди патентообладателей две японские корпорации (SONY и Simadzu) и две американские компании, одна из которых – Hyperion Ca-

talysis International – относится к ведущим мировым производителям УНТ. Одна заявка (2004 г.) и патент (2007 г.) на способ получения фуллеренов принадлежат Frontier Carbon Corporation (Япония) – ведущему мировому производителю фуллеренов, а также ее партнеру в США – TDA Research Inc. На фоне большого количества прекративших действие патентов отечественных патентообладателей (рис. 3) это служит некоей оптимистической оценкой перспектив российского рынка углеродных наноматериалов и продуктов на их основе.



Рис. 3. Динамика выдачи российских патентов на изобретения, связанные с нанотрубками и фуллеренами

Инновационный потенциал УНТ: приложения, перспективы, экономика

Приложения. УНТ обладают рекордными механическими характеристиками (прочность, жесткость), уникальными тепло- и электропроводностью, оптическими и магнитными свойствами. В зависимости от геометрических параметров они могут иметь металлическую или полупроводниковую проводимость [4]. Подобное сочетание создает для них широчайший потенциал применений: сверхпрочные волокна, пряжа, ткань; композитные материалы; чипы памяти; логические схемы; наносенсоры; полевые эмиттеры; наноэлектромеханические системы (НЭМС); искусственные мускулы; топливные элементы; хранилища для газов; солнечные батареи; электродный материал ион-литиевых батарей; суперконденсаторы; адсорбенты; биодатчики; средства для внутриклеточной доставки лекарств; материалы для имплантов и протезов; источники рентгеновского излучения; электромагнитные экраны; материалы оптоэлектроники; материалы для катализа; элементы будущих наномашин. Это не полный и далеко не закрытый список возможных применений УНТ.

В качестве примера приведем варианты использования УНТ в автомобиле: части корпуса; стекла; бамперы и отделка; покрышки колес; система безопасности; батареи; подача топлива; смазка подшипников; очистка выхлопного газа. В космическом корабле нанотрубки также могут найти применение: как высокопрочные и легкие структурные материалы (нанобумага из УНТ); для хранения водородного топлива; в НЭМС; для защиты электроники от радиации; в вычислительных устройствах с возможностью восприятия не только электронных, но и акустических, химических или тепловых сигналов; в сенсорах и сенсорных системах (недавно NASA объявило об успешном испытании на орбите газового сенсора на УНТ) и т. д. Известен также американский проект космического лифта – троса, связывающего Землю с геостационарным спутником (разрабатываемый для этой цели полимер с 60 % наполнением УНТ по прочности на разрыв в десятки раз превосходит существующие). Добавим, что проводятся эксперименты по получению самих нанотрубок в условиях невесомости.

Перспективы. Нанотрубки стали, пожалуй, самой горячей темой в технике со времен полупроводников. Однако остается вопрос: почему при таком потенциале УНТ он до сих пор не реализован? Существуют два основных барьера на пути продвижения УНТ в приложения: высокие цены и перевод великолепного сочетания свойств УНТ в наномасштабе в структурные свойства на макрошкале. Многие рекордные характеристики относятся к однослойным нанотрубкам ОУНТ (правда, в последнее время показано, что двухслойные УНТ (ДУНТ) по ряду характеристик могут составить конкуренцию ОУНТ [11]). Стоимость ОУНТ может достигать 2000 долларов за грамм. Несмотря на прогресс, получение качественных нанотрубок все еще остается высокозатратным. Существует много методов производства УНТ. Все методы делятся на две основные группы: 1) возгонки графита (электродуговое испарение, лазерная абляция) – его десублимации и 2) каталитического пиролиза углеводородов. В последние годы интерес к более разнообразным методам из второй группы устойчиво растет [11]. Каждый метод производит слегка отличающийся материал: распределением диаметра и длины нанотрубок, их хиральностью, чистотой, катализаторами, видами примеси, дефектами. Очистка увеличивает долю нанотрубок в партии, но часто может модифицировать их: открывать концы, уменьшать длину, вызывать дефекты и т. д. Характеризация, в свою очередь, требует электронного микроскопа, различных видов высокотехнологичной спектроскопии. Все это удорожает процесс. Второй барьер обусловлен недостатком научно отработанных технологических приемов, способных обеспечить указанный перевод. Однако методы совершенствуются, и не для всяких приложений требуются высокочистые ОУНТ, часто их могут заменять более дешевые в производстве многослойные нанотрубки (МУНТ). По прогнозам одного из ведущих производителей УНТ, компании Shenzhen Nanotech Port Co. (Китай), через несколько лет при производстве, превышающем 10 тонн в год, ОУНТ и ДУНТ могут стоить 0,5 долл. за грамм [12].

В России производство чистых ОУНТ исчисляется десятками граммов в год [13]. Этот материал недоступен для многих отечественных научных лабораторий из-за дороговизны и ограничений на внешние поставки (как

материал двойного применения), что, очевидно, тормозит исследования и разработку приложений. В Институте проблем химической физики РАН (ИПХФ РАН) создана перспективная технология производства ОУНТ на основе электродугового процесса (лабораторный вариант), которая при масштабировании позволяет производить чистые ОУНТ по цене около 60–100 долл. за 1 г. Это делает экономически рентабельным их применение в электронике, оптике, производстве топливных элементов [13]. По разработкам Российского химико-технологического института им. Д.И. Менделеева (РХТУ) в Тамбове создается опытное производство УНТ, которое должно быть пущено во втором полугодии 2007 г. [14]. Таким образом, в нашей стране ситуация еще далека от промышленного освоения потенциала УНТ. В разработках РХТУ основное внимание уделяется применению УНТ как наполнителей композитов и изготовлению из них макроскопических материалов, включая высокопрочные волокна и структуры на поверхности подложек. В частности, совместно с Всероссийским институтом авиационных материалов (ВИАМ) и ИПХФ РАН разработан метод введения УНТ в полиметилметакрилат [14]. ВИАМ запатентовано изобретение, относящееся к полимерным композиционным материалам (с добавлением УНТ), которые используются в элементах конструкций авиационной и космической техники [15]. Коллективом из Московского физико-технического института (МФТИ) разработан световой элемент с катодом на УНТ [6]. В настоящее время совместно с ФГУ Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов (ТИСНУМ) разрабатывается новый способ изготовления автоэмиссионных катодов из углерод-азотных нановолокон [16].

Пример коммерческого продвижения связан с международной кооперацией. На 4-ой Международной конференции по вакуумным источникам электронов (IVeSC’ 2002), проходившей в Саратове, был показан полноцветный адресуемый дисплей на нанотрубках совместного производства ООО «Волга-Свет» (Саратов, Россия) и «Copy Tele Inc.» (Нью-Йорк, США) [6]. Разработка дисплея была запатентована в 2003 г. в США совместно американской компанией «Copy Tele Inc.» и ООО «Волга-Свет» [17]. Позднее на нее был выдан российский патент (получатель патента – ФГУП Научно-исследовательский институт «Волга») [18]. В настоящее время разрабатываемые американо-российские дисплеи на УНТ близки к стадии производства. В частности, прошли испытания на надежность дисплеи с диагональю 5,5 дюйма, которые предполагают использовать в качестве информационного и навигационного оборудования автопроизводители в России. Поставщиком УНТ выступает азиатская компания. Таким образом, выстроена глобальная стоимостная цепь от наноматериала до конечного продукта, что, по-видимому, будет характерно для коммерциализации нанотехнологии.

Мировой интерес к коммерциализации нанотехнологий и УНТ отражается, в частности, в большом количестве разработанных технологических дорожных карт (ДК), которые являются своеобразным аналогом бизнес-планов и имеют разную степень детализации. Два наиболее крупных проекта нанотехнологических ДК, охватывающих и перспективы применения УНТ – Европейской комиссии и американской консультационной фирмы

Lux Research, кратко представлены в Приложении. Специально применению нанотрубок посвящена внутренняя дорожная карта европейской консультационной и инжиниринговой фирмы Willens & van den Wildenberg (Голландия, Испания) [19]. Согласно этой ДК, на 2004 г. наиболее коммерчески продвинуты (до стадии возможного массового производства) проводящие полимеры, на подходе – дисплеи с полевой эмиссией, батареи, микроскопия. На стадии первых приложений или перехода к ним – светоизлучающие устройства, устройства рентгеновского излучения, мембраны (включая топливные элементы), суперконденсаторы. Достигли стадии прикладных исследований или близки к ней высокопрочные полимеры, медицинские каркасные системы (могут применяться в восстановительной медицине, например, при выращивании нейронного импланта (при лечении инсульта) или кровеносного сосуда при лечении заболеваний сердца из стволовой клетки), материал, экранирующий электромагнитное излучение, сенсоры, интегральные схемы и память. На стадии фундаментальных исследований: усовершенствованные солнечные батареи, хранилища водорода, огнестойкие полимеры, ударновязкие керамики, искусственные мускулы и др. К 2008 г. к стадии массового производства приблизятся источники рентгеновского излучения, мембраны, суперконденсаторы. В 2014 г. к массовому производству будут готовы также: высокопрочные и огнестойкие полимеры, ударновязкие керамики, светоизлучающие устройства, сенсоры, медицинские каркасные системы, материал, экранирующий электромагнитное излучение, усовершенствованные солнечные батареи, хранилища водорода, интегральные схемы и память.

Многие достижения нанотехнологии будут внедрены через электронику (различные электронные устройства, например дисплеи, сенсоры, а также наноэлектронику). Поскольку нанотрубки ведут себя как проводники или полупроводники, они чрезвычайно полезны для приложений в наномасштабной электронике. Можно представить полностью основанную на углероде наноэлектронную технологию, при которой электропроводка состоит из металлических УНТ, а активные устройства изготовлены из полупроводниковых УНТ. Уже были продемонстрированы различные базисные электронные компоненты, включая полевые и одноэлектронные транзисторы, выпрямляющие диоды, малые логические схемы, инвертеры и ячейки памяти. Хотя в настоящее время можно построить наносхему, включающую провода, электронные ключи и элементы памяти, полностью сделанные из нанотрубок и других молекул, все же до регулярного изготовления основанных на УНТ интегральных схем необходим еще значительный прогресс.

Наноэлектроника – одна из ключевых областей для правительственного финансирования, промышленных инвестиций и венчурного капитала. По данным Ассоциации производителей оборудования для полупроводниковой промышленности (SEMI), доля наноэлектроники в мировом рынке электронной продукции должна вырасти с 18 % в 2005 г. до 48 % в 2010 г. [20, 21]. К коммерческим наноэлектронным продуктам относятся: полупроводники ($\leq$ 90 нм); память на жестких дисках (с перпендикулярной записью и т. д.); органические светодиоды; альтернативные формы памяти (с ферроэлектрической, магниторезистивной, а также УНТ технологиями

производства); сенсоры на основе УНТ; наконечники атомных силовых микроскопов. Ожидается, что в последующие несколько лет будут коммерциализованы: дисплеи с полевой эмиссией; блоки светодиодной подсветки на основе УНТ, пленки; термический контактный материал (возможно, на основе УНТ), а также, вероятно, наномеханическая память. По оценке SEMI, на рынке материалов для наноэлектроники УНТ и фуллерены будут в 2010 г. на третьем месте (после сконструированных молекул и покрытий) с рыночной долей около 9 %. В своей дорожной карте по применению УНТ в электронике мюнхенская консультационная компания Wicht Technologie Consulting (WTC) подтверждает начинающуюся коммерциализацию сенсоров и отмечает, что к 2010 г. начнется коммерциализация памяти на основе УНТ (с энергонезависимостью, высокой скоростью передачи данных и плотностью записи информации, полной масштабируемостью и другими возможностями) [22]. Далее следуют вертикальные межсоединения и радиочастотные переключатели (2015–2020 гг.), затем горизонтальные межсоединения и транзисторы (после 2020 г.).

Представляют интерес также разработки и бизнес-планы конкретных компаний, ближе стоящих к производству. Так, согласно заявлению руководства компании Nantero, первая компьютерная память на основе УНТ будет выпущена на рынок уже в конце 2007 г. по сопоставимым с конкурирующими вариантами ценам. (Nantero – малая наукоемкая нанотехнологическая компания, использующая УНТ для разработки полупроводниковых устройств следующего поколения; расположена в американском штате Массачусетс. Среди партнеров по проекту создания памяти: BAE Systems – крупная международная компания в области оборонных и аэрокосмических систем; LSI Logic Corporation – лидер на рынке памяти и сетевых решений.) Помимо энергонезависимости, высокой скорости чтения / записи, более низкого энергопотребления, к достоинствам памяти относится возможность массового производства чипов на традиционном оборудовании. В индустрии процессоров активно ищутся способы продления закона Мура, в частности на основе новых материалов, замещающих кремний. Компании IBM и Intel являются крупнейшими спонсорами исследований, направленных на раскрытие потенциальных возможностей электроники УНТ. Специалистами IBM в 2006 г., в частности, создан кольцевой генератор на основе одной нанотрубки, который является прекрасным средством для изучения характеристик углеродных электронных элементов. В Intel разработан прототип чипа, где в качестве межсоединений используются УНТ. Японская корпорация NEC создала технологию, позволяющую стабильно выращивать УНТ и изготавливать транзисторы на их основе. В NEC считают, что смогут разработать процесс производства для реализации УНТ транзисторов к 2010 г. Американская компания Motorola недавно сообщила, что ее разработки основанных на УНТ дисплеев с полевой эмиссией практически готовы из стен исследовательских лабораторий перейти в стадию серийного производства, для чего две азиатские компании уже строят производственные мощности. Однако рыночную конкуренцию ей может составить южно-корейская компания Samsung Electronics, которая планирует начать поставки первых плоско-панельных дисплеев на УНТ к концу 2007 г. Ана-

логичные разработки осуществляют также японские компании Toshiba и Canon [23].

Для приложений в электронике, как правило, необходимы высококачественные чистые и, следовательно, дорогостоящие нанотрубки, однако это не создает больших ценовых проблем, так как требуемые количества относительно малы. Более существенной проблемой является неразвитость каналов поставок, когда качество поставляемых нанотрубок может колебаться от партии к партии даже у одного поставщика. По мнению пользователей, занимающихся приложениями УНТ в электронике, поставщиков, соблюдающих надежность, немного (примерно шесть – по два в США, Европе и Японии), хотя положение в последнее время и начало улучшаться, особенно в связи с приходом на этот рынок крупных химических компаний, обладающих отлаженными системами контроля [21]. Еще одним признаком налаживания цивилизованных рыночных институтов в этой конкретной сфере является разработка наноэлектронных стандартов. В 2003 г. Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) выступил с инициативой создания дорожной карты стандартов в наноэлектронике, которые бы помогали коммерческому освоению приложений нанотехнологии в электронике [24]. Показательно, что первым (с подачи США) был принят стандарт IEEE 1650 «Стандартные методы испытания для измерения электрических свойств углеродных нанотрубок». Это первый в своем роде документ, который дает общий образец для генерации воспроизводимых электрических данных в отношении нанотрубок. По заявлению IEEE, мировые организации уже регулируют в соответствии с ним свои методы снятия характеристик. В процессе разработки находится второй стандарт IEEE P1690 «Стандартные методы для определения характеристик углеродных нанотрубок, применяемых в качестве добавок в объемные материалы». В этом году предусмотрен запуск 5 наноэлектронных стандартов, два из которых для наноустройств, включающих наномасштабные сенсоры и эмитирующие устройства.

Можно привести другие примеры хороших перспектив УНТ, в силу их способности улавливать глубокие макроэкономические и научно-технические тренды. По данным Американской ассоциации производителей композитов, Бюро экономического анализа, Американского института чугуна и стали и Агентства по минеральным ресурсам (цитируемым в [25]), с 1960 по 2004 гг. производство композитов в США увеличилось в 16 раз, тогда как ВВП вырос в 3, выпуск алюминия в 4, а стали – в 2 раза. Растет использование углеродных композитов, в частности для производства пассажирских (компания Boeing, США) и военных самолетов; военных судов с применением технологии Стэлс (компания Kockums, Швеция); баллистических ракет (Китай); лопастей воздушных винтов в установках ветровой энергетики (Европейский мегапроект) и т. д. Сейчас ученые усиленно работают над созданием композитных материалов, представляющих собой полимеры с добавлением УНТ. При успешном решении проблемы сопряжения поверхностей полимера и нанотрубки, обеспечивающего эффективную передачу нагрузки от полимерной матрицы к нанотрубке, будут получены материалы, которые, сочетая пластичность и низкую стоимость полимеров

с хорошей электропроводностью и высокой прочностью УНТ, окажутся уникальным средством для решения многих экономических задач [26].

Инженеры NASA утверждают, что применение углеродных нанотрубок революционизирует космические полеты, и выделяют, по меньшей мере, восемь важнейших систем будущего транспортного средства, при создании которых могут использоваться УНТ [27]. О многочисленных военных приложениях говорится в обзоре [28].

Экономика. УНТ и продукты на их основе должны стать важной частью мирового нанотехнологического рынка, который, по оценке специалистов Национального научного фонда США (ННФ США), сделанной в 2001 г., должен составить к 2015 г. 1 трлн американских долларов ежегодно. Позже воздействие нанотехнологии на глобальный экономический выход было оценено еще выше: 1 трлн долларов уже в 2010 г. (инвестиционный банк Evolution Capital); 2,6 трлн долларов в 2014 г. (консультационная фирма Lux Research). Заметим, что приведенные оценки, помимо прочего, могут зависеть от используемого определения нанотехнологии. Например, определение, принятое в Национальной нанотехнологической инициативе США, исключает микроэлектромеханические системы (МЭМС) или микроэлектронику. Однако есть ряд проблем и барьеров на пути реализации экономического потенциала нанотехнологии [29].

На рис. 4 показана динамика мировых инвестиций в исследования и разработки в области нанотехнологии, осуществляемых правительствами, корпорациями и венчурным капиталом. Фокус государственных инвестиций – долговременные исследования, частных же – прикладные НИР начальной стадии.

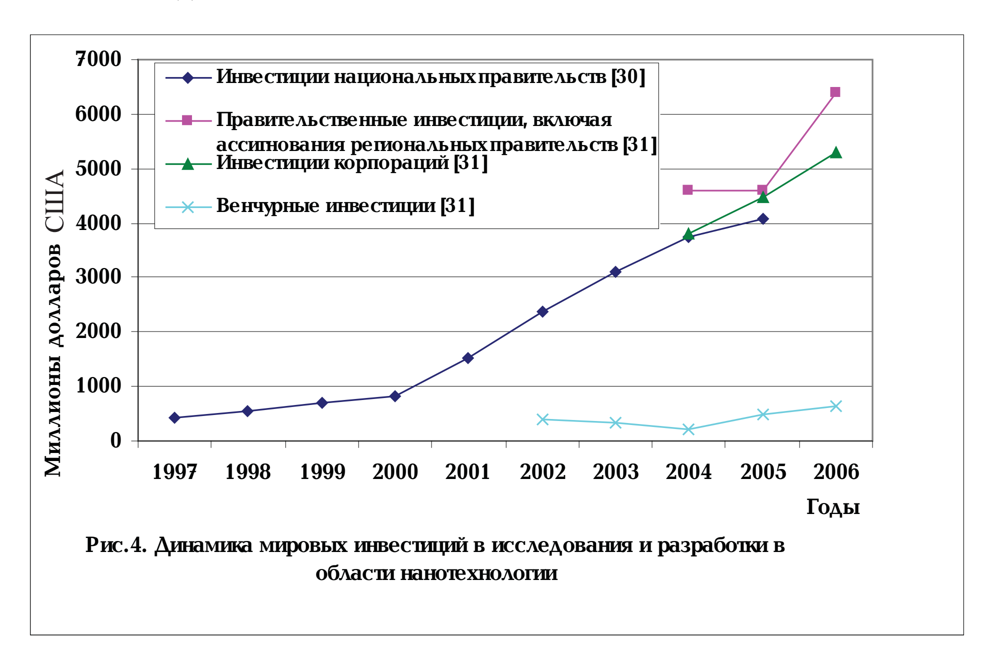


Рис.4. Динамика мировых инвестиций в исследования и разработки в области нанотехнологии

Венчурный капитал призван сыграть решающую роль в переводе нанотехнологии из лабораторий на рынок, однако его доля в общих инвестициях пока низка (5,2 % в 2005 г.). Вложения венчурного капитала в нанотехнологию составили в 2005 г. всего 2 % от его мировых объемов. Несмотря на рекламный ажиотаж вокруг нанотехнологии (количество употреблений самого этого слова в популярной прессе, по данным Lux Research, растет экспоненциально), поведение мирового венчурного капитала по отношению к ней весьма сдержанно и далеко не то, что было, скажем, в Силиконовой Долине в 1990-е годы. Множественность приложений, зависимость от научной инновации, отсутствие на начальном этапе исторической статистики об успехах и неудачах, невозможность зачастую без специальных знаний правильно распознать нанотехнологию порождают существенные неопределенности для инвесторов. Отсутствие стандартов, регулирующих норм, достоверной информации о рисках для окружающей среды, здоровья, безопасности также могут быть барьером на пути нанотехнологии (в том числе продуктов на основе УНТ) к рынку, поскольку компании не могут гарантировать населению и своим работникам, что их продукты полностью безопасны. По оценке известной консультативной фирмы Frost & Sullivan (США), динамика доходов нанотехнологических компаний в 1996–2004 гг. была противоречивой [32].

Еще одно препятствие связано с так называемыми «патентными дебрями». Для нанотрубок сложившаяся ситуация столь остра, что предлагается учредить форум по УНТ-патентам, который мог бы облегчить заинтересованным компаниям навигацию по запутанному патентному ландшафту. Защита интеллектуальной собственности представляет проблему и в отдаленной перспективе, поскольку нанотехнология обеспечивает широкий диапазон материалов и производственных платформ, что, в свою очередь, предполагает возможность достижения целевых характеристик нанопродукта (например, энергонезависимой компьютерной памяти высокой емкости) самыми разными путями. Оба указанных обстоятельства могут сказаться на модели ведения нанобизнеса, снижая в ней вес ИС [29].

В настоящее время наноматериалы доминируют на мировом нанотехнологическом рынке, причем нанотрубки представляют наиболее быстро растущий их сегмент: до 2011 г. ежегодный рост объема продаж УНТ прогнозируется в среднем на 73,8 %. Суммарная производительность установленных в мире мощностей оценивалась на 2006 г. примерно в 270 тонн в год для МУНТ и около 7 тонн в год для ОУНТ. Наибольшие производственные мощности сконцентрированы в Азии, далее следуют Северная Америка и Европа [33]. На сегодняшний момент в мире свыше ста производителей УНТ, большинство из которых – университетские лаборатории, производящие нанотрубки для собственных исследований. Среди компаний, производящих нанотрубки на продажу, наиболее известны: Carbon Nanotech Research Institute (Япония), Hyperion Catalysis International (США), ILJIN (Южная Корея), Nanocyl S.A. (Бельгия), Nanoledge (Франция), Rosetter Holdings (Кипр), Shenzen Nanotech Port Co (Китай), Showa Denko (Япония), Sun Nanotech (Китай), Thomas Swan (Великобритания), Unidym (США). Комбинированный тип производителей представляют, например, такие компа-

нии, как Motorola Labs, IBM. Заметим, что спрос и реальное производство пока сильно уступают потенциальным возможностям. Согласно докладу аналитической компании BCC Research (США), глобальный рынок УНТ составил в 2006 г. 50,9 млн долларов, к концу 2007 г. достигнет 79,1 млн долларов (что соответствует 2–3 тоннам продукта), а в 2011 г., по прогнозу, будет равен 807,3 млн долларов [34]. По объемам продаж в стоимостной форме УНТ значительно превосходят фуллерены. 81,5 % продаж приходится в настоящее время на сектор композитов, 7,7 % – на сектор электроники и всего 0,3 % – на энергетический сектор. В 2011 г. картина должна измениться: композиты по-прежнему будут преобладать, хотя их доля в объеме продаж УНТ снизится до 55,9 %; электроника повысит свою долю до 36,2, а энергетика до 6,6 %. В приведенных расчетах не выделена нанобиотехнология. Отметим, что прогнозные оценки рынка УНТ достаточно сложны из-за необходимости учитывать множество факторов: зависимость от дополняющих продуктов (например, телевизоров или других форм дисплеев); конкуренцию со стороны продуктов-заменителей (например, кремниевых нанопроводов или других, нежели основанные на УНТ, типов дисплеев); фазу общеэкономического цикла (так, при подъеме телевизоры заменяются быстрее, чем при спаде) и т. д. – поэтому с течением времени они могут уточняться.

По мере развития нанотехнологии, раскрытия ее возможностей и вызовов расширяется круг аналитических и управленческих задач, для решения которых необходим адекватный методологический инструментарий. Реализуемые и возможные направления его формирования обсуждаются в следующем разделе.

О методологической основе анализа процессов развития нанотехнологии

Первая попытка дать коллективную прогностическую оценку результатов развития и социального воздействия нанотехнологии на ближайшие десятилетия была сделана на специальном семинаре «Социальные последствия нанонауки и нанотехнологии», проведенном в США в 2000 г. [35]. На нем же была отмечена важность комплексных междисциплинарных естественнонаучных и социально-экономических исследований этого многогранного явления. В этой связи полезен хотя бы краткий очерк методов, позволяющих комплексно подойти к изучению процессов развития нанотехнологии. Как показали уже первые работы [36, 37], значительный вклад в создание объективной картины развития нанотехнологии способны дать наукометрические исследования. Наличие современных баз данных в принципе позволяет, применяя средства информационного анализа и наукометрии, оперативно сформировать достаточно целостное и структурированное представление о состоянии и перспективах развития конкретного научного направления, его прикладном потенциале. Расчет библиометрических показателей, формализованный (лингво-статистический) анализ текстовых массивов усиливают и дополняют экспертные оценки при выработке решений. Анализ патентной информации позволяет изучать динамику изобретательской актив-

ности, связь патентуемых результатов с проводимыми исследованиями, а с другой стороны, структуру формируемой интеллектуальной собственности и основные направления коммерциализации нанотехнологических инноваций. Количество уже выполненных наукометрических исследований, посвященных нанотехнологии, и их постоянный поток столь велики, что заслуживают отдельного обзора. Наряду с библиометрической статистикой и патентными данными, весьма полезным источником информации для количественного анализа становятся исследовательские проекты, финансируемые научными фондами [8]. Причем, они важны не только с точки зрения оценки научных групп и организаций, анализа географической структуры науки, схем кооперации, но и с точки зрения содержания – как источника информации для отслеживания появления и динамики новых научных тематик, технологического форсайта и т. д. Учетные данные об участниках проектов позволяют рассчитать численность, структурные характеристики исследовательских кадров, которые информативны для оценки перспектив развития научной области или ее отдельного направления [8].

Достаточно полезным и весьма распространенным методом активного прогнозирования в сфере нанотехнологий становится форсайт. В настоящей статье проиллюстрирован ряд технологических дорожных карт, построенных по этому методу. В России начаты работы по подготовке национальной программы форсайта в сфере нанотехнологии, вышла книга на эту тему [38]. В основе метода «форсайт» лежат, как известно, экспертные оценки (метод Дельфи, сценарный анализ и др.). Однако они часто недостаточны для предвидения, особенно в таких сложных областях, как нанотехнология, с ее междисциплинарностью, высокими темпами развития, многовариантностью приложений и т. д. Понятно, что форсайт перспектив конкретного направления не много дает без точного расчета будущего обеспечения квалифицированными кадрами, а высокий темп появления новых тематик (которые необходимо отслеживать, например, путем формализованного анализа контента специализированных полнотекстовых массивов) способен быстро менять картину будущего. К достоинствам количественных (формализованных) методов относится то, что, несмотря на упрощающие моменты, они обеспечивают объективность и большую сопоставимость результатов. Таким образом, комплексная методология должна в идеале сочетать качественные подходы (базирующиеся на экспертных суждениях) с количественными (расчетом наукометрических показателей, кластерным анализом, а в перспективе – с математическими и компьютерными моделями). Возможность такого сочетания дают, например, многокритериальные методы [39], которые часто применяются в процедурах формирования портфеля проектов [40].

По мере экономического продвижения нанотехнологии все большую роль будут играть методы экономического, экономико-математического анализа. В отсутствие единого нанотехнологического рынка, аналитической основой для изучения экономических аспектов нанотехнологии должна стать стоимостная цепь, которую можно представить в виде трех стадий: *наноматериалы* (наномасштабные структуры в необработанном виде) → *промежуточные нанопродукты* (полуфабрикаты с наномасштабными свой-

ствами) → *продукты на основе нанотехнологии* (конечные товары, включающие нанотехнологию). Именно анализ на основе стоимостных цепей позволил специалистам из Lux Research более точно оценить коммерческий потенциал нанотехнологии, показать, что для инвесторов выгоднее сосредоточить внимание на приложениях, находящихся в средней части таких цепей как потенциально наиболее прибыльных и т. д. [41]. Данная методология в настоящее время развивается с учетом глобального характера нанотехнологических стоимостных цепей (см. пример с плоскопанельными дисплеями на основе УНТ в предыдущем разделе).

В инвестиционных проектах в сфере нанотехнологии значительна роль исследований и разработок, а первоначальные инвестиции в НИР высоко неопределенны и носят стратегический характер. Традиционные методы дисконтированного денежного потока (например, чистой приведенной стоимости) приводят, как правило, к недооценке таких инвестиций, с существенными последствиями для ранжирования и отбора проектов. Данной ситуации адекватен опционный подход. Это подтверждает, в частности, распространенная практика опционных контрактов на проведение исследований и разработок между крупными компаниями и молодыми наукоемкими фирмами при коммерциализации продуктов на базе углеродных наноматериалов. Однако есть ряд принципиальных трудностей при оценке инвестиций в НИР с позиции реальных опционов. Во-первых, базовый актив (ценность проекта) может изменяться лишь в дискретные моменты времени, в отличие от цены на акции. Кроме того, если в исследованиях превалирует фундаментальная составляющая (что не редкость для нанотехнологии), априори не исключена вероятность вообще нулевого результата. Разработка адекватных моделей оценки вложенных реальных опционов способствовала бы устранению искажений при оценивании инвестиций в нанотехнологические проекты, в частности повышала бы вес стратегических инвестиций с высокой степенью неопределенности. К сказанному добавим: форсайт нужен, когда имеется неопределенность, но как раз в этих случаях эффективен и опционный подход. Выявление и оценка реального опциона есть, по существу, построение числовой меры (в стоимостной форме) инвестиционного решения с учетом будущих неопределенностей как технологического, так и рыночного характера. При определенном уровне неопределенности [42] оценка опционов может быть полезным инструментом в процессе форсайта.

Складывающуюся в нанотехнологии ситуацию все чаще характеризуют как гонку, когда фирмы (или государства) инвестируют в НИР, с тем чтобы, опередив соперников, занять монопольное положение на открывающихся рынках. Часто новички вступают в борьбу с доминирующей фирмой, стремясь вытеснить ее за счет радикальной технологической инновации, в разработку которой они вкладывают инвестиции. Соперничество может иметь международный аспект, и тогда в него могут включиться правительства стран, резидентами которых являются конкурирующие фирмы. Стратегии фирм – скрытые и текущие расходы на исследования и разработки, стратегии правительств – субсидии, налоги или стандарты. Такая и подобные ей конкурентные ситуации вполне реальны для нанотехнологии, а активная

стандартизация, как мы видели на примере наноэлектроники, уже началась. Уместно заметить, что американское правительство часто использует упреждающие стандарты для улучшения стратегического положения своих фирм при международном соперничестве в сфере НИОКР [43]. Традиционный экономико-математический аппарат эффективен при анализе экономической конкуренции (по Вальрасу), однако он не вполне приспособлен для исследования конкурентных отношений в сфере исследований и разработок из-за их высокой неопределенности и побочных эффектов. Для этих случаев требуется адаптация и развитие специального класса математических моделей [43].

Конечно, комплекс методов для многоаспектного анализа процессов развития нанотехнологии (а сюда должны входить также правовые, экологические, этические и др. аспекты) не может быть построен сразу в завершенном виде, однако актуальность этой задачи весьма высока. В настоящем предварительном очерке рассмотрены лишь некоторые из возможных шагов. Подчеркнута важность количественных (формализованных) методов и подходов, целесообразность их сочетания с качественными (экспертными) методами.

Заключение

Есть растущие основания полагать, что нанотехнология способна внести значимый вклад в технологический прогресс и тем самым – в экономический рост. Подобно химии, она имеет широкий спектр приложений в целом ряде секторов и на самых разных этапах производственного процесса, подобно распространению электричества – способна создавать совершенно новые производственные возможности, которые постепенно преобразуют все аспекты экономической деятельности.

Производство потенциальных нанотехнологических инноваций зависит от трех основных факторов:

1) достижений в получении нового научного знания;
2) способности коммерциализовать эти достижения;
3) доступности капитала для реализации первых двух факторов.

Фактор 3 в настоящее время в России присутствует; правда, нужно отметить, что капитал требуется в физической форме, а подготовка, например, квалифицированных исследовательских кадров требует значительного времени. Роль финансирования исследований хорошо видна на примере двух родственных углеродных наноструктур – фуллеренов и нанотрубок. В первом случае, благодаря целевой государственной поддержке – в 1993 г. в рамках российской ГНТП «Актуальные направления в физике конденсированных сред» было сформировано программное направление «Фуллерены и атомные кластеры»; удалось сформировать национальное сообщество исследователей, равноправно сотрудничающих с зарубежными коллегами, добиться ряда первоклассных результатов и на этой основе создать более сотни патентоспособных изобретений, часть из которых доведена до готовых технологий. Таким образом, первоначальные инвестиции государства в исследования создали своеобразный опцион на продолжение участия

России в мировом «фуллереновом проекте». К сожалению, мы пропустили момент, когда мировые приоритеты сместились в пользу более перспективных УНТ. Недостаточное финансирование исследований сказалось на научном рейтинге России в одном из ключевых направлений (8-е место по сравнению с 3-м местом в фуллеренах), ухудшило возможность восприятия и обмена передовыми научными результатами с лидирующими странами, сдерживает участие российских ученых в поиске более экономичных способов массового производства УНТ и т. д. Можно добавить, что Китай, в котором исследования УНТ начались позже, чем у нас, в результате целевой государственной поддержки по темпам роста публикаций вышел на первое место, а по количеству ежегодно производимых публикаций вплотную приблизился к США (рис. 2). Учитывая стратегический характер данного вида наноматериала, необходимо наладить его массовое производство в России, и в первую очередь обеспечить качественными нанотрубками научно-исследовательский сектор. Ведь, подобно инфокоммуникационным технологиям, в нанотехнологии именно научные прорывы создают предложения, которые трансформируются затем в благоприятные возможности для экономического развития (кто, например, 10–15 лет назад мог думать о сотовых телефонах или домашнем Интернете?).

При коммерциализации научных достижений практически все страны сталкиваются с теми или иными препятствиями, для нас же главное – отсутствие инфраструктуры. Даже при наличии достаточного финансирования решение инфраструктурных задач потребует времени, в течение которого была бы целесообразна международная кооперация. Отсутствие такой кооперации (например, в области стандартизации и сертификации продукции, технологического маркетинга) закроет нам выход на внешние рынки. Несмотря на продолжающуюся эйфорию, происходит осознание, что процесс коммерциализации нанотехнологии, по крайней мере в ее магистральных направлениях, не будет быстрым. Можно напомнить: для полной коммерциализации различных продуктов на основе МЭМС потребовалось от 14 до 36 лет [44]. Так что расчет на «низко висящие яблочки» здесь неуместен. Важность нанотехнологии для отраслей производства состоит в том, что она становится для них элементом трансформирования в экономику знаний, построение которой входит в долговременный курс нашей страны.

Приложение

Наиболее масштабный проект Европейской комиссии «Nano Road Map Project» имеет 10-летний охват (2004–2014 гг.); в нем участвует около 350 экспертов, в качестве основной процедуры используется метод Дельфи [45]. Разработано 12 технологических ДК, сгруппированных по трем секторам: 1) материалы; 2) здоровье и медицинские системы; 3) энергетика. Для примера рассмотрим третий. Четыре ДК в энергетическом секторе посвящены: а) солнечным батареям; б) термоэлектричеству; в) перезаряжаемым батареям и суперконденсаторам; г) теплоизоляции и теплопроводности.

В первом энергетическом подсекторе УНТ, так же как и фуллерены, не являются лидерами и, как ожидается, пройдя стадии фундаментальных и

прикладных исследований, к 2014 г. они выйдут лишь на первые приложения. В плане коммерциализации они далеко позади тонких пленок и батарей на основе красителей и электролитов. Возрастающе важную роль в предстоящее десятилетие нанотехнология будет играть в термоэлектричестве, главным образом через разработку и применение новых материалов, включая тонкие пленки, наночастицы, нанокристаллические материалы, сверхрешетки. Нанотрубки не найдут сколь-либо значимого применения в этом энергетическом подсекторе. Перезаряжаемые батареи и суперконденсаторы – портативные источники энергии, применяемые в мобильных телефонах и портативных компьютерах, – их сопряжение с солнечными батареями или ветряными генераторами способно служить вариантом возобновляемой энергетики. Признано, что нанотехнология предлагает решение для многих проблем, относящихся к разработке этих источников энергии, поэтому выполняемые исследования находятся на более продвинутой стадии по сравнению с другими областями энергетики. В результате ожидается, что нанотехнология будет играть важную роль на рынке батарей и суперконденсаторов уже к 2009 г., с дальнейшим усилением позиций к 2014 г. Рынок «с пониманием» воспримет даже значительный рост издержек ввиду повышения эксплуатационных характеристик предлагаемых нанопродуктов. Воздействие ожидается в нескольких направлениях: увеличение плотности энергии и мощности, улучшение коэффициента зарядки / разрядки и др., – для чего потребуется сосредоточить внимание на разработке электродов и, в меньшей степени, электролитов. Наиболее вероятными лидерами при разработке электродных материалов, по мнению экспертов, будут нанокомпозиты и наночастицы, за которыми следуют тонкие пленки, УНТ и нанопровода. В последнем энергетическом подсекторе нанотехнология, как ожидается, будет играть важную роль уже к 2009 г. Исследования и разработки в области тонких пленок и наночастиц приведут к практическим приложениям (сверхтвердые материалы, переключаемые покрытия для глазурования), которые к 2014 г. могут достигнуть массового производства. УНТ будут привлекать исследовательский интерес, и к 2014 г. они могут достигнуть первых приложений, главным образом в связи с улучшенной теплопроводностью и «умным» глазурованием.

Представленные дорожные карты отражают преимущественно европейский взгляд на развитие ситуации. Вообще же, расхождения в оценках, содержащихся в разных ДК, возможны из-за субъективной составляющей.

Согласно продуктовой ДК консультационной фирмы Lux Research из Нью-Йорка, среди конечных продуктов, включающих нанотехнологии, с долей в продуктовом сегменте более 10 % к 2009 г. подойдут только компьютеры и самолеты, а среди промежуточных –топливные элементы, встроенные дисплеи, логические чипы и чипы памяти [46]. К 2014 г. к первой группе, по прогнозу, добавятся потребительская электроника, спортивные товары, бытовая техника, автомобили, зубоврачебное оборудование, медицинские инструменты, медикаменты и т. д., а ко второй – нанокомпозиционные покрытия, солнечные батареи, устройства памяти, компоненты оптики, ортопедические материалы, биологические маркеры и др. Во многих из перечисленных продуктов используются УНТ.

Литература

1. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. 1991. Vol. 354, № 6348.
2. Iijima S., Ichihashi T. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter // Nature. 1993. Vol. 363. № 6430.
3. Bethune D.S., Kiang C.H., Vries de M.S. et al. Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls // Nature. 1993. Vol. 363. № 6430.
4. Харрис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. М.: Техносфера, 2003.
5. Гуляев Ю.В. Углеродные нанотрубные структуры – новый материал для эмиссионной электроники // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 5.
6. Жбанов А.И., Синицын Н.И., Торгашов Г.В. Устройства наноэлектроники на основе углеродных нанотрубок // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2004. Т. 47. № 5– 6.
7. Терехов А.И., Терехов А.А. Развитие научно-исследовательских работ по приоритетному направлению «Индустрия наносистем и материалы»: анализ и оценка позиций России в области наноматериалов // Вестник РФФИ. 2006. № 4 (48).
8. Терехов А.И. Тенденции развития областей нанонауки и нанотехнологий с использованием исследовательских проектов // Наука. Инновации. Образование. М.: РИЭПП; Парад, 2007. Вып. № 2.
9. Young J.L. Patent analysis for preparation and application of carbon nanotubes // http://www.kosef.re.kr/community/suica/upload/300/927/4.pdf
10. Berger M. Growing nanotechnology problems: navigating the patent labyrinth // www.nanowerk.com/spotlight/spotid=1367.php
11. Раков Э.Г. Получение тонких углеродных нанотрубок каталитическим пиролизом // Успехи химии. 2007. Т. 76. № 1.
12. Zhang Chuan Yi. Production and applications of carbon nanotubes (CNTs) // www.nanotubes.com.cn/05nanotubes.pdf
13. Крестинин А.В. Проблемы и перспективы развития индустрии углеродных нанотрубок в России // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 5–6.
14. Раков Э.Г. Волокна с углеродными нанотрубками // http://rustm.net/catalog/article/572.html
15. Патент № 2223988 РФ. Полимерное связующее, композиционный материал на его основе и способ его изготовления / Каблов Е.Н., Гуняев Г.М., Ильченко С.И., Пономарев А.Н., Кривонос В.В., Комарова О.А., Копылов А.Е. 20.02.2004.
16. Бормашов В.С., Лешуков М.Ю., Шешин Е.П., Бланк В.Д., Буга С.Г., Батов Д.В., Альшевский Ю.Л. Новый метод изготовления автокатодов из углерод-азотных нановолокон // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 1.

17. Patent № 6614149 US. Field-emission matrix display based on lateral electron reflections / Kastalsky A., Shokhor S., DiSanto F.J., Krusos D.A., Gorfinkel B., Abanshin N. 02.09.2003.
18. Патент № 2253176 РФ. Катодолюминесцентный матричный экран / Горфинкель Б.И., Русина Е.В., Абаньшин Н.П., Мухина Е.Г., Никишин Н.В., Бурматова И.В. 27.05.2005.
19. Bax L., Rodriguez J.P. Sectoral report: Nanomaterials // www.nanoroadmap.it/events/first_conference/presentations/bax.pdf
20. Sheet L.L. Nanoelectronics research and market opportunities in US and Japan // http://wps2a.semi.org/wps/portal/_pagr/113/_pa.113/813
21. Carbon Nanotubes // Nano News from SEMI. 2006. Vol. 1. № 2.
22. Haan S. Carbon nanotubes roadmaps – opportunities in electronics // www.nano-rf.org/ws-pdf/de%20Haan.pdf
23. «Углеродное» будущее электроники. Последние достижения // www.ixbt.com/editorial/carbon.shtml
24. IEEE invites input on nanoelectronics roadmap // www.smalltimes.com/articles/stm_print_screen.cfm?ARTICLE_ID=291234
25. Don Wood. Paper promise // Research in Review. 2006. Vol. 16. № 1.
26. Елецкий А.В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 3.
27. http://science.nasa.gov/headlines/y2002/16sep_rightstuff.htm.
28. Бочаров Л.Ю., Иванов А.А., Мальцев П.П. О зарубежных программах по военной нанотехнологии. Ч. 2 // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 1.
29. Gasman L.D. Nanotechnology Applications and Markets. Norwood, MA: Artech House, 2006.
30. Roco M.C. International perspective on government nanotechnology funding in 2005 // Journal of Nanoparticle Research. 2005. Vol. 7. № 6.
31. www.luxresearchinc.com/
32. Nanotechnology: Growth opportunities and investment overview // www.frost.com/prod/servlet/cpo/40230968
33. Blackmon R. Scaling up CNT production, separation, purification // www.wtec.org/cnm/workshop/CNM_Full_Proceedings.pdf
34. Электронный ресурс: www.bccresearch.com/pressroom/RNANO24C.htm
35. Roco M.C., Bainbridge W.S. (eds.). Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
36. Braun T., Schubert A., Zsindely S. Nanoscience and nanotechnology on the balance // Scientometrics. 1997. Vol. 38. № 2.
37. Meyer M., Persson O. Nanotechnology – interdisciplinarity, patterns of collaboration and differences in applications // Scientometrics. 1998. Vol. 42. № 2.
38. Нанотехнологии: Форсайт / Под ред. Н.В. Гапоненко; Центр исследований проблем развития науки РАН. М.: Современная экономика и право, 2006.

39. Терехов А.И. Многокритериальные методы планирования крупномасштабных кадровых систем (обзор) // Экономика и математические методы. 1995. Т. 31. № 4.
40. Liesio J., Mild P., Salo A. Preference programming for robust portfolio modeling and project selection // European Journal of Operational Research. 2007. Vol. 181. № 3.
41. Statement of Findings: Sizing the Nanotechnology's Value Chain // www.allassets.com/pdfs/sizingnanotechnologysvaluechain.pdf
42. Tegart G., Johnson R. Some advances in the practice of Foresight // http://forera.jrc.es/fta/fta2004.html
43. Терехов А.И. Математические модели соперничества в сфере НИОКР // Математическое моделирование. 2003. Т. 15. № 4.
44. Grace R.H. The 2006 report card on the barriers to the commercialization of MEMS and nanotechnology // http://rgrace.com/Papers/2006_Report_Card.pdf
45. Roadmaps at 2015 on nanotechnology application in the sectors of: Materials, Health and Medical Systems, Energy // www.nanoroadmap.it/roadmaps/NRM_SYNTHESIS.pdf
46. Nordan M.M. Nanotechnology: Where does the U.S. stand? // http://gop.science.house.gov/hearings/research05/june29/nordan.pdf